



---

**BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM**  
**VEGYÉSZMÉRNÖKI ÉS BIOMÉRNÖKI KAR**  
**OLÁH GYÖRGY DOKTORI ISKOLA**

## **A MIKROALGA ALAPÚ BIOFINOMÍTÓK FEJLESZTÉSE AZ ENERGIAHATÉKONYSÁG NÖVELÉSE ÉRDEKÉBEN**

Tézisfüzet

Szerző: Fózer Dániel  
Témavezető: Prof. Dr. Mizsey Péter

Kémiai és Környezeti Folyamatmérnöki Tanszék



2019

## 1. Bevezetés

A fosszilis energiahordozók alkalmazása és az erőművi füstgázok kontrollálatlan emissziója fokozza a környezetet negatívan érintő globális felmelegedést és klímaváltozást. A disszertáció motivációja olyan biológiai és kémiai technológiák vizsgálata amelyek elősegítik az antropogén eredetű üvegházhatású gázok kibocsátásának mérséklését.

Harmadik generációs - mikroalga alapú - biofinomítók képesek a körforgásos gazdaság által támasztott fenntarthatósági és rentabilitási követelményeknek megfelelő módon előállítani bioüzemanyagokat és magas hozzáadott értékkel rendelkező termékeket. Ennek köszönhetően ezen biofinomítók fejlesztését napjainkban kiemelt figyelem övezi, mivel alkalmazásukkal csökkenthető az üvegházhatású gázok emissziója.

A disszertáció célja (1) mikroalga alapú biofinomítók energiahatékonyságának vizsgálata, (2) biofinomítói szűk keresztmetszetek azonosítása, (3) a szén-dioxid megkötés és tárolás folyamatlánc környezeti hatásainak csökkentése, (4) a mikroalga tenyésztés hatásfokának növelése, (5) a mikroalga tenyésztés és hidrotermális elgázosítás közötti kapcsolat vizsgálata és (6) a hidrotermális elgázosítás során nyerhető gázhozam növelése.

## 2. Irodalmi áttekintés

A rohamosan növekvő népesség és az ezzel explicit módon együtt járó növekvő energiaigények új és fenntartható energiaforrások használatát és elterjedését igénylik. Mikroalga alapú biofinomítók jelentős szerepet tölthetnek be a szén-dioxid megkötés és hasznosítás területén, mivel a fotoszintetizáló sejtek képesek szén-dioxidot megkötni a levegőből és ipari füstgázokból, hogy aztán anyagcseréjük során azokból magas hozzáadott értékkel rendelkező vegyületeket (fehérjéket, lipideket, szénhidrátokat) állítsanak elő. Ennek megfelelően a megtermelt alga biomassza alkalmas alapanyag különböző magas energiasűrűséggel rendelkező bioüzemanyagok (mint például biodízel, bioetanol, biogáz), gyógyszeripari alapanyagok, táplálék kiegészítők és műtrágyák előállítására.<sup>1</sup>

A bioüzemanyagok az alkalmazott alapanyag minősége szerint 3 fő kategóriába sorolhatóak: (i) az első generációs bioüzemanyagok élelmezési célra is alkalmazható

---

<sup>1</sup> Zhu, L., Biorefinery as a promising approach to promote microalgae industry: An innovative framework, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 41:1376-1384, doi: 10.1016/j.rser.2014.09.040

növényekből, biomasszából készülnek, (ii) a második generációs bioüzemanyagok alapanyagai energianövények és biológiai hulladékok míg (iii) harmadik generációs bioüzemanyagok mikroorganizmusok felhasználásával állíthatóak elő.<sup>2</sup>

A mikroalgák alkalmazása több szempontból is előnyösebb a szárazföldi növényekhez képest: a mikrobák (pl. mikroalga) fotoszintetikus hatásfoka és fajlagos növekedési sebessége az exponenciális szakaszban kiemelkedően magas, így egyes törzsek képesek 24 óra alatt megduplázni a tenyésztési közegen belüli sejttömegüket. A szezonálisból eredő limitációk könnyebben kiküszöbölhetőek, nagyságrenddel kevesebb termőterületet igényelnek, a tenyésztési paraméterek kontrollálhatóak, így a kívánalmaknak megfelelő minőségű biomassza állítható elő. Ugyanakkor a harmadik generációs bioüzemanyagok előállítását különböző akadályok nehezítik, mint például hogy a mikroalga biomassza rendkívül híg szuszpenzióban tenyészthető ( $0\text{--}5\text{--}4\text{ g L}^{-1}$ ) és hogy a megtermelt biomassza feldolgozása komplex műveleti egységek sorozatából tevődik össze.

A világon felhasznált energia nagy része szénhidrogének elégetéséből származik ahol a keletkező egyik égéstermék a szén-dioxid. A fosszilis üzemanyagok alkalmazása következtében az atmoszféra  $\text{CO}_2$  koncentrációja az elmúlt évtizedekben drasztikusan megemelkedett. A fosszilis erőművek az antropogén szén-dioxid emisszió 30-40%-áért felelősek, így ezen pont szén-dioxid források kiváló lehetőséget kínálnak az atmoszférába kerülő üvegházhatású gázok kibocsátásának mérséklésre.<sup>3</sup> A mikroalga biomassza közvetlenül is alkalmazható szén-dioxid megkötésére, amennyiben az erőművi füstgáz nem tartalmaz toxikus komponenseket ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , nehézfémek) magas koncentrációban. Ellenkező esetben más kémiai alapú módszerek alkalmazhatóak a szén-dioxid füstgázból történő leválasztására (pl.: abszorpció).

A szén-dioxid megkötés és tárolás (Carbon Capture and Storage, CCS) egy olyan folyamat, melynek során a különböző forrásból származó füstgáz  $\text{CO}_2$  tartalmát megkötve, majd a szeparált  $\text{CO}_2$ -t szállítva és tárolva csökkenteni lehet az atmoszférába kerülő szén-dioxid mennyiségét. A CCS folyamat során megkötött és komprimált  $\text{CO}_2$ -ot egy tárolásra alkalmas helyre szállítják, amely lehet geológiai tárolóhely (pl.: kimerült olaj-, földgáz mező), óceáni alapkőzet és üledék réteg.

---

<sup>2</sup> Brennan, L., Owende P., Biofuels from microalgae – a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products, Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2010, 14(2):557-577 doi: 10.1016/j.rser.2009.10.009

<sup>3</sup> Anwar, M., Fayyaz, A., Sohail, N., Khokhar, M., Baqar, M., Khan, W., Rasool, K., Rehan, M., Nizami, A.,  $\text{CO}_2$  capture and storage: A way forward for sustainable environment. Journal of Environmental Management, 2018, 226:131–144. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.08.009.

A mikroalga biomassa fotoszintetikus anyagcseréje során CO<sub>2</sub>-ot köt meg, melyből magas hozzáadott értékkel rendelkező komponenseket állít elő. A mikroalga alapú biofinomítók két fő részre bonthatók: upstream és downstream egységekre. A mikroalga sejtek tenyésztése és betakarítása az upstream részegységben, míg a megtermelt biomassa feldolgozása a downstream egységben történik. Mikroalga biomassa tenyésztése nyílt (raceway-medence) és zárt rendszerekben (fotobioreaktorok) is megvalósítható. Fotoautotróf szervezetek esetén az egyik legfontosabb tenyésztési paraméter a megfelelő megvilágítás biztosítása. Zárt beltéri tenyésztési rendszerek esetén a mesterséges fényforrások növelik a kultúra növekedését befolyásoló paraméterek számosságát a fény hullámhosszal és intenzitással. Mikroalga biomassa tenyésztésére különböző mesterséges fényforrások alkalmazhatóak, pl.: világító diódák (light emitting diodes, LEDs), nagyintenzitású kisülőlámpák vagy fluoreszcens csövek. A LED-ek nagy előnye a hosszú élettartalom és a magas hatásfok, így alkalmas külső fényforrásnak bizonyulnak fotoszintetizáló szervezetek tenyésztésére.<sup>4</sup>

Mikroalga biomassa feldolgozása többféle úton történhet (pl.: fermentálás, átszterilizálás, termokémiai és hidrotermális technológiák). A hagyományos biofinomítói struktúrában a biomasszában található értékes komponenseket (pl.: lipidek, szénhidrátok) kinyerik, majd azt követően átalakítják magas fűtőértékkel rendelkező energiahordozókká (bioetanol, biodízel). A hátránya ezen eljárásoknak, hogy a biomasszának csak egy részét használják fel, illetve, hogy a biomasszát elő kell kezelni, víz tartalmát csökkenteni kell. Biomassa feldolgozása a hagyományos extrakciós művelet mellett elvégezhető termokémiai (pl.: pirolízis, elgázosítás), illetve hidrotermális technológiákkal is. A hidrotermális technológiák nagy előnye az előző kettővel szemben, hogy a biomassa mellett levő víztartalom akár 80-90 tömegszázalék is lehet, nem igénylik a biomassa előzetes szárítását, így jelentős mennyiségű energiát lehet megtakarítani. Az alkalmazott reakciókörülményektől függően meg lehet különböztetni hidrotermális elszenesítést, elfolyósítást és elgázosítást.

Hidrotermális elgázosítás egy olyan termokémiai folyamat amely során magas hőmérsékleten (T=450-700°C) és nyomáson (p=221-350 bar) a nedves biomassa átalakítható H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO és CO<sub>2</sub> tartalmú biogázzá.<sup>5</sup> A hidrotermális elgázosítást olyan

---

<sup>4</sup> Blanken, W., Cuaresma, M., Wijffels, R.H., Janssen, M., Cultivation of microalgae on artificial light comes at cost, *Algal Research*, 2013, 2:333-340, doi: 10.1016/j.algal.2013.09.004.

<sup>5</sup> Gai, C., Zhang, Y., Chen, W-T., Zhang, P., Dong, Y., An investigation of reaction pathways of hydrothermal liquefaction using *Chlorella pyrenoidosa* and *Spirulina platensis*, *Energy conversion and*

olyan modellvegyületek esetén is vizsgálták, mint a cellulóz, huminsav, lótrágya.<sup>6</sup> Néhány tanulmány foglalkozik mikroalga biomassza vizsgálatával, ahol az általánosan megfogalmazott cél a reakciókörülmények mérséklése, különböző törzsek és katalizátorok vizsgálata.<sup>7,8</sup>

A mikroalgákat tenyésztő és feldolgozó biofinomítók előtt álló egyik legjelentősebb technológiai kihívás a termékhozamok és a biomassza produktivitás növelése mely az upstream és downstream technológiák fejlesztésével valósulhat meg.

### 3. Anyagok és módszerek

A harmadik generációs biofinomítók energiamérlegének megállapítása során a vizsgált upstream részegység magába foglalta a biomassza tenyésztését (nyitott raceway-medencék és zárt cső típusú fotobioreaktorok) és betakarítást és a koncentrációt (flukkulálás és centrifugálás). A downstream részegység esetén két fő feldolgozási folyamatláncot vizsgáltam: (1) a hagyományos száraz út magában foglalja a biomassza előkezelését (sejtfeltárás, szárítás, őrlés), lipidek oldószeres extrakcióját, átészterezést, az algapogácsa atmoszférikus elgázosítását, valamint a keletkező termék tisztítását a vonatkozó standardoknak (ASTM D6751 és EN14214) való megfelelés jegyében. A (2) vizes - hidrotermális - út a hidrotermális elfolyósító műveleti egységet, bio-olaj stabilizálást és hidrogénezést tartalmazott.

A monoetanolamin-víz abszorpciót magában foglaló szén-dioxid megkötés és tárolás technológia környezeti hatásait életciklus elemzés (LCA) segítségével vizsgáltam. A disszertációban tárgyalt LCA elemzések SimaPro v8.3 szoftver alkalmazásával készültek el. A leltáranalízishez az Ecoinvent v3.1 adatbázist és tudományos publikációkat használtam fel. Az egyes alternatívák környezeti hatásait 4 különböző hatásvizsgálati módszerrel értékeltem ki: (a) IPCC 2007 (100a), (b) Eco-indicator 99, (c) IMPACT 2002+ és (d) EPS 2000. A technológiai láncot érintő külső

---

*management*, 2015, 96:330-339 doi: 10.1016/j.enconman.2015.02.056

<sup>6</sup> Madenoglu, T.G., Saglam, M., Yüksel, M., Ballice, L., Hydrothermal gasification of biomass model compounds (cellulose and lignin alkali) and model mixtures, *The Journal of Supercritical Fluids*, 2016, 115:79-85 doi: 10.1016/j.supflu.2016.04.017

<sup>7</sup> Onwudili, J.A., Lea-Langton, A.R., Ross, A.B., Williams, P.T., Catalytic hydrothermal gasification of algae for hydrogen production: Composition of reaction products and potential for nutrient recycling, *Bioresource Technology*, 2013, 127:72-80 doi: 10.1016/j.biortech.2012.10.020

<sup>8</sup> Norouzi, O., Safari, S., Jafarian, S., Tavasoli, A., Karimi, A., Hydrothermal gasification performance of *Enteromorpha intestinalis* as an algal biomass for hydrogen-rich gas production using Ru promoted Fe-Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocatalysts, *Energy Conversion and Management*, 141:63-71, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2016.04.083

faktorok vizsgálatára PESTLE (politikai, gazdasági, szociális, technológiai, jogi, környezeti) és többváltozós döntésanalízist alkalmaztam (MCDA). Az alternatívák közötti rangsor megállapítására MAVT (Multi-Attribute Value Theory) módszert alkalmaztam.

Mikroalga biomassa (*Chlorella vulgaris*) tenyésztését mikrotiter lemezekon és laboratóriumi méretű kevert tartály típusú fotobioreaktorokban végeztem el. A sejttömeg növekedését optikai denzitás és szárazanyag tartalom mérésével követtem.

Mikroalga biomassa hidrotermális elgázosításának (HTG) vizsgálata csőreaktor rendszer segítségével történt. A csőreaktort elektromos kemencében helyeztem el, ahol 550°C-on, 300 bar nyomáson átlagosan 120 másodperc tartózkodási idő mellett vizsgáltam a HTG folyamatot. A folyamatban keletkező biogázt vezetőképességi és lángionizációs detektorokkal szerelt gázkromatográffal vizsgáltam.

#### **4. Eredmények**

A biofinomítói energiamérleg számítások célja a legelőnyösebb nettó energia aránnyal (NER) rendelkező konverziós technológia kiválasztása, valamint a biofinomítói szűk keresztmetszetek azonosítása volt. A számítások során megállapítást nyert, hogy a biomassa szárítás, szén-dioxid abszorpció, atmoszférikus elgázosítás, hidrotermális elfolyósítás és a nyitott és zárt tenyésztési rendszerekben történő tenyésztés szignifikáns energia igénnyel rendelkezik. Ezen műveleti egységek kis mértékű javításával jelentősen lehet befolyásolni egy mikroalga alapú biofinomító energiahatékony működését. A száraz downstream út esetén a legnagyobb (a teljes energiaigény 45%-át kitevő) energiaigénye a szárítási műveletnek van, ami kiemeli algszárítást megelőző víztelenítés (flokkulálás, centrifugálás) fontosságát. A második legnagyobb energiaigénnyel a szén-dioxid abszorpció rendelkezik (22.7%). A tenyésztett mikroalga törzstől és a füstgáz toxikus komponenseinek koncentrációjától függően a füstgáz közvetlenül is alkalmazható CO<sub>2</sub>-forrásként, melynek eredményeként a szén-dioxid abszorpciót elhagyva jelentős energiamennyiséget lehet megtakarítani. A számítási eredmények azt mutatják, hogy nem érhető el pozitív energiamérleg azon finomítói alternatívák üzemeltetése során, melyek magukba foglalják a füstgázból történő szén-dioxid leválasztást. A lipidek extrakciója után visszamaradt algapogácsa elgázosítása szintén szignifikánsnak bizonyul (12.12%), ugyanakkor jelentős energiatöbblet (a triglicerinek átészterezéséhez képest 1.68-szor nagyobb energiamennyiség) érhető el a műveleti egység alkalmazásával. A fennmaradó műveleti egységek együttes

energiaigényének részaránya a teljes energiaigényt tekintve 12.96%. A számítások alapján megállapítást nyert, hogy a száraz downstream útnak önmagában olyan nagy az energiaigénye, hogy az alkalmazott tenyésztési rendszerektől függetlenül pozitív energiamérleg nem érhető el. A vizes downstream út esetén a legnagyobb energiaigénnyel a szén-dioxid abszorpció (40.44%) rendelkezik. A HTL egység energiaigénye 21.67%, amit tenyésztési szakasz követ (15.44%). Vizsgálataim során öt különböző tenyésztési módszert és két downstream konverziós utat vizsgáltam és hasonlítottam egymással össze. A nettó energia arány kettő esetben bizonyult 1-nél nagyobbak: az ORP rendszerekben és a spirális elrendezésű cső típusú fotobioreaktorokban megvalósított tenyésztés a vizes - hidrotermális - downstream konverziós úttal párosítva, ahol a NER értékek rendre 1.109 és 1.137. A műveleti egységek energiamérlegeinek vizsgálata során biofinomítói szűk keresztmetszetként azonosítottam a biomassza szárítást, szén-dioxid megkötést és a mikroalga tenyésztést.

A szén-dioxid megkötés és tárolás (CCS) folyamatlánc környezeti hatásait cradle-to-gate („a bölcsőtől a kapuig”) típusú életciklus elemzésekkel (LCA) vizsgáltam. A szimulációk során megállapítást nyert, hogy a CCS technológia a kontrollálatlan CO<sub>2</sub> emisszióhoz képest előnyösebb a globális felmelegedési potenciál szempontjából, ugyanis a technológia alkalmazásával 278 kg CO<sub>2,eq</sub>-el (35.9%-al) csökkenthető a károsanyag kibocsátás. Azonban a több hatáskategóriát tartalmazó Eco-indicator 99 és IMPACT 2002+ hatásvizsgálati módszerekkel elvégzett szimulációk alapján megkérdőjelezhető a CCS technológia alacsony környezeti terhelése. A CCS folyamatlánc leltáranalízisének vizsgálatakor megállapítást nyert, hogy a legmagasabb energiaigény és környezeti terhelés is a CO<sub>2</sub> abszorpciónál alkalmazott monoetanolamin regenerálásához társítható. A környezeti hatások csökkentésére 2 megközelítést alkalmaztam: (1) folyamatfejlesztést, amely magában foglalja hőintegráció és abszorber/füstgáz arány optimalizálás hatásának vizsgálatát, (2) a MEA regenerálásához szükséges hő megújuló forrásokból történő biztosítását. A környezeti hatások vizsgálatakor megállapítást nyert, hogy folyamatfejlesztéssel tovább csökkenthető 550,5 kg CO<sub>2,eq</sub>-el a károsanyag kibocsátás, de önmagában ez még nem elégséges mivel az Eco-indicator 99 módszer alapján a CCS technológiához társuló környezeti hatások magasabbak a kontrollálatlan CO<sub>2</sub> emisszióhoz képest. Az Eco-indicator 99 és IMPACT 2002+ módszerekkel végzett szimulációk szerint, a legnagyobb környezeti terhelés a fosszilis üzemanyagok alkalmazásához társítható. Az Ecoinvent 3.1 adatbázis alapján különböző megújuló forrásból származó alternatív üzemanyagok hatásait vizsgáltam

(pl.: fa, fa pellet, valamint mezőgazdasági hulladékból származó biogáz). Az IMPACT 2002+ hatásvizsgálati módszer esetén megállapítást nyert, hogy a megújuló biogáz alapú CCS alternatíva környezeti terhelése a fosszilishez képest 3.43-szor, míg az Eco-indicator 99 módszer esetén 3.22-ször alacsonyabb.

A PESTLE analízis során az egyes CCS alternatívákat befolyásoló külső faktorokat vizsgáltam. A legelőnyösebb CCS alternatívát többváltozós döntésanalízis segítségével határoztam meg. Az MAVT módszer alapján a legideálisabb alternatívának a megújuló energiával üzemelő CCS technológia bizonyult (0.73 MAVT pont). Ezt követte a folyamat fejlesztéseket tartalmazó CCS alternatíva (0.47 MAVT pont), a kontrollálatlan CO<sub>2</sub> emisszió (0.24 MAVT pont) és a fosszilis alapú CCS technológia (0.07 MAVT pont).

A mikroalga biomassza tenyésztését befolyásoló fényfaktorok (fényintenzitás és hullámhossz) hatásait mikroplate-n (MTP) és laboratóriumi méretű kevert tartály típusú fotobioreaktorokon vizsgáltam. A kísérletek során megállapítást nyert, hogy az alkalmazott *Chlorella vulgaris* mikroalga törzs esetében a vizsgált hullámhosszak közül (piros (626 nm), kék (470 nm), zöld (525 nm), sárga (626 nm & 525 nm), lila (626 nm & 470 nm), kékeszöld (525 nm & 470 nm), fehér (626 nm & 525 nm & 470 nm) a kevert színekkel magasabb biomassza produktivitás érhető el. A tenyésztési szakasz végén a legmagasabb szárazanyag tartalmat is kevert színekkel értem el a következő sorrendben: lila (626 nm & 470 nm) > sárga (626 nm & 525 nm) > kékeszöld (525 nm & 470 nm) > fehér (626 nm & 525 nm & 470 nm). Megállapítottam, hogy a legmagasabb biomassza produktivitás dikrimatikus piros és kék hullámhosszokon érhető el, ugyanakkor de Mooij és munkatársai<sup>9</sup> ezen beállításokon a legalacsonyabb produktivitást mérték *Chlamydomonas reinhardtii* esetén, ami az ideális fényfaktoros beállítások törzsspecifikusságát mutatja.

Ezt követően az MTP rendszeren belül vizsgálni kezdtem középponti kompozíciós kísérleti terv segítségével (Central Composite Design, CCD) a fényintenzitás (Piros: 174.60-312.32  $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , Kék: 42.02-151.49  $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) hatásait 5 különböző szinten. A kísérleti eredményeket válaszfelületi módszer segítségével értékeltem ki. A vizsgált statisztikai modell megfelelőnek bizonyult (normális eloszlást követett, az  $R^2=0.9889$ , a lack-of-fit teszt inszignifikáns volt). A statisztikai modell

---

<sup>9</sup> de Mooij, T., Schediwy, K., Wijffels, R.H., Janssen, M., Modelling the competition between antenna size mutant and wild type microalgae in outdoor mass culture, Journal of Biotechnology, 2016, 240:1-13, doi: 10.1016/j.jbiotec.2016.10.009.



alapján megállapítást nyert, hogy a legmagasabb biomassa produktivitás 241.34 és 95.97  $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$  piros és kék fényintenzitás mellett érhető el. A vizsgálatok során azonosítottam két szélsőértéket, a fotolimitációt és a fotoinhibíciót. Ismételt kísérletekkel modell verifikációt végeztem el, ahol megerősítést nyert, hogy a statisztikai modell megfelelő, a számított és mért értékek közel esnek egymáshoz ( $R^2=0.9842$ ).

Méretnövelést követően laboratóriumi méretű kevert tartály típusú fotobioreaktorok segítségével vizsgáltam a legideálisabbnak talált 626 és 470 nm-n a fényintenzitás (178.9 (Piros) & 64.8 (Kék)  $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , 256.9 (Piros) & 102.1 (Kék)  $\mu\text{mol foton m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) és levegőztetés (0.50-0.75 vvm) hatásait egy  $2^2$ -s faktoros kísérleti terv segítségével. A legmagasabb szárazanyag tartalmat (0.644 g L<sup>-1</sup>) 256.9 (Piros) & 102.1 (Kék)  $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$  fényintenzitás és 0.75 vvm levegőztetés esetén sikerült elérni. A különböző fényintenzitás és levegőztetés szinteken elvégzett fermentációk esetében mikroalga biomassa biológiai összetétele (fehérje, lipid, szénhidrát tartalma) eltérőnek bizonyult. Magas fényintenzitás és levegőztetés szinteken magasabb lipidtartalmat sikerült elérni, míg magas fényintenzitás, de alacsony levegőztetés mellett a szénhidrát tartalmat sikerült megnövelni. Ezt követően azt vizsgáltam, hogy az eltérő biológiai összetétel befolyásolja-e a hidrotermális elgázosítás során keletkező biogáz minőségét és az egyes gázkomponensek arányát.

A célzott tenyésztés során előállított mikroalga biomassa hidrotermális elgázosítását (HTG) csőreaktor rendszerben végeztem el 550°C-on, 300 bar nyomáson, 120 másodperc átlagos tartózkodási idő mellett. A vizsgálatok során bizonyítást nyert, hogy az eltérő biológiai összetétellel befolyásolni lehet a HTG folyamatban keletkező biogáz minőségét. Amikor a célzott tenyésztés során a sejtekben sikerült megnövelni a lipidtartalmat, akkor az elgázosítás során ezen minták esetén magasabb metánhozamot sikerült elérni. Míg azon alga minták esetén, amelyeknél a szénhidrát tartalom megnőtt, a HTG folyamat során nőtt a hidrogén hozam. A legmagasabb hidrogén hozam 9.34 mol kg<sup>-1</sup>-nak adódott, amely több mint duplája a legalacsonyabb elért értékhez képest (4.38 mol kg<sup>-1</sup>). Ez azért jelentős, mert ez kizárólag a célzott biomassa tenyésztés eredménye. A fermentációk során a magas biomassa produktiváshoz magas lipidtartalom társult, aminek eredményeként a metánhozam 0.35 mol kg<sup>-1</sup>-ről 1.68 mol kg<sup>-1</sup>-ra nőtt. Összegezve tehát megállapítást nyert, hogy a HTG folyamat során a gázhozam növelhető a tenyésztésben történő fényfaktoros optimalizációt követően, így javítva a teljes finomítói lánc energiahatékony működését.

## 5. Tézisek

### 1.Tézis [I, IV, V, VII]

Meghatároztam különböző tenyésztési rendszereket és downstream műveleti egységeket magába foglaló autotróf mikroalgákat feldolgozó binomítói alternatívák energiamérlegét. Azonosítottam finomítói szűk keresztmetszeteket amelyek jelentősen csökkentik az energiahatékonyságot. Ezek a műveleti egységek a biomassza szárítás, CO<sub>2</sub> abszorpció, atmoszférikus elgázosítás, hidrotermális kezelés és a tenyésztési rendszer. Meghatároztam, hogy energia nyereség csőtípusú fotobioreaktorok és hidrotermális konverzió alkalmazásán keresztül lehetséges.

### 2.Tézis [II, VIII]

Életciklus elemzést alkalmazva meghatároztam, hogy a monoetanolamin-víz abszorpció hatékonyságának hőintegrációval történő növelésével a szén-dioxid megkötés és tárolás folyamatlánc globális felmelegedési potenciálja 71%-al csökkenthető. A CO<sub>2</sub> megkötés folyamat környezeti terhelése Eco-indicator 99 módszer szerint 67%-al csökkenthető, amennyiben a folyamat során a fosszilis energiahordozók helyett megújulók kerülnek alkalmazásra.

### 3.Tézis [II, VIII]

A szén-dioxid megkötés és tárolás folyamatlánc átfogó vizsgálatára egy algoritmust fejlesztettem. A környezeti hatásvizsgálatot kibővítettem további külső befolyásoló faktorokkal a PESTLE analízist alapul véve, ahol a CCS alternatívák közötti rangsoroláshoz többváltozós döntésanalízist alkalmaztam. A megújuló energiákat alkalmazó CCS alternatívát a fosszilis és folyamatfejlesztett alternatívákhoz képest a legelőnyösebb alternatívaként azonosítottam.

### 4.Tézis [III, VI, IX]

*Chlorella vulgaris* MACC555 mikroalga biomassza esetén meghatároztam a legideálisabb mesterséges megvilágítási paramétereket a biomassza produktivitás növelése érdekében. Dikromatikus világító diódákat alkalmazva 626 és 470 nm-en ez rendre 241.34 és 95.97  $\mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$  fényintenzitás értékek mellett érhető el.

### **5.Tézis [III, IX]**

Meghatároztam, hogy *Chlorella vulgaris* MACC555 esetén a lipidtartalom előnyösen befolyásolható kevert tartály típusú fotobioreaktorokon belül 250 rpm keverés mellett a fény intenzitás és levegőztetés faktorokkal. A levegőztetést 0.50 vvm-ről 0.75-re növelve a lipidtartalom 1.75-szörösére növelhető, míg a szénhidrát tartalom 2.34-szer alacsonyabb.

### **6.Tézis [III, IX, X]**

Meghatároztam, hogy *Chlorella vulgaris* MACC555 esetén fényfaktoros optimalizáció és ideális levegőztetés alkalmazása javítani tudja a hidrotermális elgázosítás esetén keletkező gázok összetételét és hozamát. Meghatároztam, hogy a hidrogén hozam 4.96 mol kg<sup>-1</sup> értékkel növelhető amennyiben a tenyésztési szakaszban a szénhidrát tartalom 2.34-szeresére növekszik.

## **6. Alkalmazási lehetőségek**

A PESTLE és MCD analízis alkalmazása vizsgált folyamattól függetlenül alkalmas módszer és algoritmus adott technológiákat befolyásoló külső és belső tényezők vizsgálatára, azonosítására, amely így mintegy kibővítve az élelciklus elemzést, részletesebb összképet ad a vizsgált technológiát illetően, így jelentősen segíti a döntéshozatali mechanizmust.

A mikroalga biomassa produktivitása és tenyésztésének határfoka növelhető optimális fényfaktorok alkalmazásával. Ideális megvilágítási paraméterek megválasztásával növelni lehet a sejtekben levő lipid és szénhidrát tartalmat így befolyásolva a hidrotermális elgázosítás során keletkező gázok minőségét. Ily módon a teljes biofinomítói struktúra határfoka növelhető, amely javítja az üzemi marginokat és a rentábilis üzemmenetet.

## 7. Közlemények

### A disszertáció alapjául szolgáló közlemények

- I. Fozer, D., Valentinyi, N., Racz, L., Mizsey, P., Evaluation of microalgae-based biorefinery alternatives, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2017, 19(2) 501-515. doi: 10.1007/s10098-016-1242-8 (IF<sub>2016</sub>=3.331, Q1, I=8)
- II. Fozer, D., Sziraky, F.Z., Racz, L., Nagy, T., Tarjani, A.J., Toth, A. J., Haaz, E., Benko, T., Mizsey, P., Life cycle, PESTLE, and Multi-Criteria Decision Analysis of CCS process alternatives, *Journal of Cleaner Production*, 2017, 147, 75-85. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.056 (IF=5.651, D1, I=11)
- III. Fozer, D., Kiss, B., Lorincz, L., Szekely, E., Mizsey, P., Nemeth, A., Improvement of microalgae biomass productivity and subsequent biogas yield of hydrothermal gasification via optimization of illumination, *Renewable Energy*, 2019, 138:1262-1272 doi: 10.1016/j.renene.2018.12.122 (IF=4.900, D1)
- IV. Fozer, D., Valentinyi, N., Racz, L., Mizsey, P., Harmadik generációs biofinomítói alternatívák értékelése, *Ipari Ökológia*, 2016, 3-22 (in Hungarian), doi:-

### Szóbeli előadások

- V. Fozer, D., Valentinyi, N., Racz, L., Mizsey, P., Harmadik generációs – mikroalgán alapuló – biofinomítói alternatívák értékelése, *XXXIX. Kémiai Előadói Napok*, **17.10.2016**, Szeged, Hungary (in Hungarian)
- VI. Fozer, D., Kiss, B., Nemeth, A., Determine optimal growth conditions for *Chlorella vulgaris*, *Proceedings of the 12<sup>th</sup> Fermentation Colloquium*, **19-21.10.2016**, Keszthely, Hungary (in Hungarian)
- VII. Fozer, D., Mizsey, P., Mikroalgák az energiaiparban, egy harmadik generációs biofinomító energiamérlege, *MTA Vegyipari Művelési és Gépészeti Munkabizottság és az MKE Műszaki Kémiai Szakosztály ülése*, **08.06.2017** Budapest, Hungary, (in Hungarian)
- VIII. Fozer, D., Sziraky, F.Z., Racz, L., Nagy, T., Tarjani, A.J., Toth, A. J., Haaz, E., Benko, T., Mizsey, P., Life cycle and PESTLE analysis of CCS alternatives, *7<sup>th</sup> European Young Engineers Conference*, **23-25.04.2018**, Warsaw, Poland
- IX. Fozer, D., Farkas, C., Kiss B., Lorincz L., Toth AJ., Andre, A., Nagy, T., Tarjani AJ., Haaz, E., Valentinyi, N., Nemeth, A., Szekely, E., Mizsey, P., The investigation and improvement of hydrothermal gasification parameters on microalgal biomass, *7<sup>th</sup> European Young Engineers Conference*, **23-25.04.2018**, Warsaw, Poland

- X. Fozer, D., Mizsey, P., Szén-dioxid megkötés és hatékony hasznosítása mikroalga alapú technológiával, *Magyar Kémikusok Egyesülete BAZ megyei Területi Szervezete és a Miskolci Akadémiai Bizottság Vegyészet Szakbizottsága - 35. Borsodi Vegyipari Nap*, **22.11.2018**, Miskolc, Hungary (in Hungarian)
- XI. Fozer, D., Sztancs, G., Kiss, B., Toth A.J., Nemeth A., Nagy, T., Mizsey P., Hydrothermal carbonization of *Chlorella vulgaris* for upgrading the yields of hydrothermal gasification, *Application of supercritical fluids 2018*, **17.05.2018**, Budapest, Hungary
- XII. Fozer, D., Sztancs, G., Kiss B., Toth A.J., Haaz E., Nemeth A., Mizsey P., Biogáz előállítás *Chlorella vulgaris* és *Chlorella zofingiensis* hidrotermális elgázosításával, *III. Gazdálkodás és Menedzsment Tudományos Konferencia 2018*, **27.09.2018**, Kecskemét, Hungary, (in Hungarian)
- XIII. Fozer, D., Toth, A.J., Kiss, B., Nagy, T., Nemeth, A., Mizsey, P., Hydrothermal Gasification of *Chlorella vulgaris* and *Chlorella zofingiensis* for the Production of Fuel Gases, *51th GOMA Fuels Symposium*, **17-19.10.2018**, Opatija, Croatia
- XIV. Fozer, D., Greenery - Közösségi alapú zöldhálózati információs rendszer, *Klímakonferencia - Klímastratégia és éghajlatváltozási platform létrehozása Budapesten*, **17.11.2017**, Budapest, Hungary (in Hungarian)

### **Egyéb közlemények**

- XV. Cespi, D., Passarini, F., Cavani, F., Volanti, M., Neri, E., Mizsey, P., Fozer, D., Terephthalic acid from renewable sources: early stage sustainability analysis of a bio-PET precursor, *Green Chemistry*, 2019, doi: 10.1039/C8GC03666G (IF=8.586, D1)
- XVI. Andre, A., Nagy, T., Toth, A.J., Haaz, E., Fozer, D., Tarjani, A.J., Mizsey, P., Distillation contra pervaporation: comprehensive investigation of isobutanol-water separation, *Journal of Cleaner Production*, 2018, 187:804-818., doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.157 (IF=5.651, D1, I=1)
- XVII. Tarjani, A.J., Toth, A.J., Nagy, T., Haaz, E., Valentinyi, N., Andre, A., Fozer, D., Mizsey, P., Thermodynamic and Exergy Analysis of Energy-Integrated Distillation Technologies Focusing on Dividing-Wall Columns with Upper and Lower Partitions, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(10):3678-3684  
doi: 10.1021/acs.iecr.7b04247 (IF=3.141, D1, I=2)
- XVIII. Toth, A.J., Haaz, E., Valentinyi, N., Nagy, T., Tarjani, A.J., Fozer, D., Andre, A., Selim, A., Solti, Sz., Mizsey, P., Selection between separation alternatives: Membrane Flash Index (MFLI), *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(33):11366-11373,  
doi: 10.1021/acs.iecr.8b00430 (IF=3.141, D1)

- XIX. Racz L., Fozer D., Nagy T., Toth A.J., Haaz E., Tarjani A.J., Andre A., Selim A.K.M., Valentinyi N., Mika L.T., Deak, Cs., Mizsey, P., Extensive comparison of biodiesel production alternatives with Life Cycle, PESTLE and Multi-Criteria Decision Analyses, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2018, 20(9):2013-2024, doi: 10.1007/s10098-018-1527-1 (IF=2.337, Q2, I=1)
- XX. Haaz, E., Fozer, D., Nagy, T., Valentinyi, N. Andre, A. Matyasi, J. Balla J., Mizsey, P., Toth, A.J., Vacuum evaporation and reverse osmosis treatment of process wastewaters containing surfactant material: COD reduction and water reuse, *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2019, doi: 10.1007/s10098-019-01673-5 (IF=2.337, Q2)
- XXI. Haaz E., Valentinyi N., Tarjani A.J., Fozer D., Andre A., Selim A.K.M., Rahimli F., Nagy, T., Deak Cs., Mizsey P., Toth A.J., Platform molecule removal from aqueous mixture with organophilic pervaporation: experiments and modelling, *Periodica Polytechnica-Chemical Engineering*, 2019, 63:138-146., doi: 10.3311/PPch.12151 (IF=0.877, Q3)
- XXII. Valentinyi, N., Andre, A., Haaz, E., Fozer, D., Toth A.J., Nagy, T., Mizsey, P., Experimental investigation and modelling of the separation of ternary mixtures by hydrophilic pervaporation, *Separation Science and Technology*, 2019, Accepted manuscript, doi: 10.1080/01496395.2019.1569692 (IF=1.200, Q2)
- XXIII. Selim, A., Valentinyi, N., Nagy, T., Toth, A.J., Fozer, D., Haaz, E., Mizsey, P., Effect of Ag-nanoparticles generated in poly (vinyl alcohol) membranes on ethanol dehydration via pervaporation, *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2018, doi: 10.1016/j.cjche.2018.11.002 (IF=1.712, Q2)
- XXIV. Tarjani, A.J., Toth, A.J., Nagy, T., Haaz, E., Fozer, D., Andre, A., Mizsey, P., Controllability features of dividing-wall column, *Chemical Engineering Transactions*, 2018, 63:403-408 doi: 10.3303/CET1869068 (Q3)
- XXV. Toth, A.J., Haaz, E., Nagy, T., Tarjani, A.J., Fozer, D., Andre, A., Valentinyi, N., Mizsey, P., Novel method for the removal of organic halogens from process wastewaters enabling water reuse, *Desalination and Water Treatment*, 2018, 13:54-62, doi: 10.5004/dwt.2018.22987 (IF=1.383, Q2)
- XXVI. Toth, A.J., Haaz, E., Solti, Sz., Valentinyi, N., Andre, A., Fozer, D., Nagy, T., Mizsey, P., Parameter estimation for modelling of organophilic pervaporation, *Computer-Aided Chemical Engineering*, 2018, 43:1287-1292, doi: 10.1016/B978-0-444-64235-6.50226-6 (Q3)
- XXVII. Toth, A.J., Haaz, E., Nagy, T., Tarjani, A.J., Fozer, D., Andre, A., Valentinyi, N., Solti, Sz., Mizsey, P., Treatment of pharmaceutical process wastewater with hybrid separation

- method: distillation and hydrophilic pervaporation, *Liquid Waste Recovery*, 2018, 3:8-13, doi: 10.1515/wtr-2018-0002
- XXVIII. Toth, A.J., Haaz, E., Szilagyi, B., Nagy, T., Tarjani, A.J., Fozer, D., Andre, A., Valentinyi, N., Solti, Sz., Mizsey, P., COD reduction of process wastewater with vacuum evaporation, *Liquid Waste Recovery*, 2018, 3:1-7, doi: 10.1515/wtr-2018-0001
- XXIX. Fozer, D., Kiss, B., Lorincz, L., Toth, A.J., Andre, A., Tarjani A.J., Nagy, T., Haaz E., Valentinyi, N., Nemeth A., Szekely, E., Mizsey, P., Metán és hidrogén tartalmú biogáz előállításának vizsgálata mikroalga biomassza hidrotermális elgázosításával, *Körforgásos Gazdaság és Környezetvédelem/Circular Economy and Environmental Protection*, 2017, 1(4):5-16, doi:-